

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างตามวิธีการออกแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปจะใช้วิธีการวิเคราะห์การทรุดตัวที่แนะนำโดย Terzaghi and Peck (1948) โดยโครงสร้างที่ใช้เสาเข็มรับแรงเสียดทานจะสมมติให้มีฐานรากเสมือนที่ระดับความลึก 2 ใน 3 ของความยาวเสาเข็มและเริ่มทำการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่ระดับดังกล่าว โดยเสาเข็มที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันและทำการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีดังกล่าว มักจะถูกออกแบบให้มีอัตราส่วนความปลอดภัยประมาณ 2.5 ถึง 3

โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวแบบผ่นความยาวเสาเข็ม (Relief Pile) มีการใช้เสาเข็มที่มีความยาวแตกต่างกัน อัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็มในแต่ละช่วงความยาวจึงมีค่าแตกต่างกันไปด้วย และอาจจะมีผลต่อวิธีการวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็ม

Bengt H. Fellenius ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยมุ่งเน้นที่ผลอันเกิดจากแรงเสียดทานลบ (Negative Skin Friction) ที่มีต่อวิธีการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากและเสาเข็ม

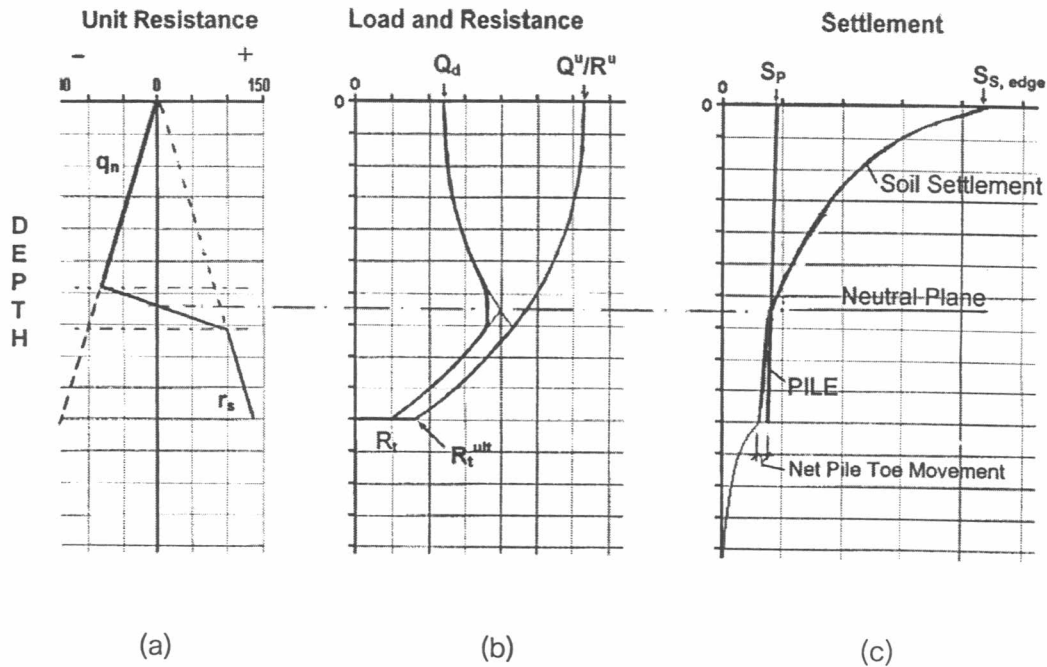
แรงเสียดทานลบ (Negative Skin Friction) เป็นปรากฏการณ์ที่ดินบริเวณรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวลงเร็วกว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น

- 1) น้ำหนักของวัสดุถม
- 2) การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำอันเนื่องมาจากการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินในดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตอกเสาเข็ม
- 3) การลดลงของระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น

อันเนื่องมาจากสาเหตุดังกล่าว ทำให้ดินที่อยู่รอบเสาเข็มมีแนวโน้มที่จะถ่วงน้ำหนักของตัวเองลงบนเสาเข็ม แรงที่กระทำต่อเสาเข็มนี้เรียกว่า “แรงจูด” (Drag Load) โดยแรงจูดที่เกิดขึ้นเมื่อรวมกับน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้าง จะมีค่าเท่ากับแรงต้านทาน (แรงเสียดทานประลัยรวมกับแรงต้านทานบางส่วนที่ปลายเสาเข็ม) เสมอ

ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศของแรงเสียดทานจากลบเป็นบวกคือตำแหน่งของ “ระนาบสะเทิน” หรือ “Neutral Plane” (รูป 2.1(a)) และผู้วิจัยจะขอใช้คำว่า “Neutral Plane” แทนความหมายของ “ระนาบสะเทิน” ในเนื้อหาของงานวิจัย

Neutral Plane นอกจากจะเป็นตำแหน่งสมดุลของแรงที่กระทำต่อเสาเข็มแล้ว Neutral Plane ยังเป็นระนาบบนเสาเข็มที่ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับดินที่อยู่รอบข้าง โดยเสาเข็มกับดินอาจจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น แต่เคลื่อนที่ด้วยอัตราที่เท่ากัน (รูป 2.1(c))



รูป 2.1 (a) การกระจายหน่วยแรงของแรงเสียดทานลบและแรงเสียดทานบวกตลอดความยาวของเสาเข็มในดินที่เป็นเนื้อเดียวกัน, (b) การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ, (c) ลักษณะการทรุดตัวของเสาเข็มและดินที่อยู่รอบเสาเข็ม

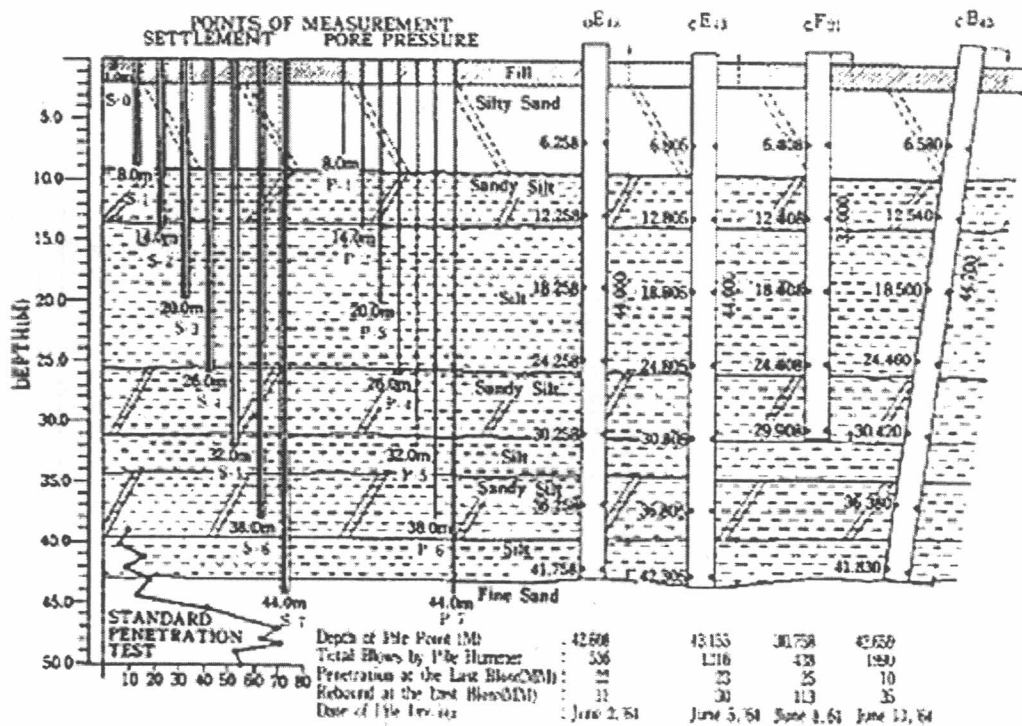
รูป 2.1(b) เส้นทงขวามือแสดงการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ในสภาพที่กำลังรับแรงเสียดทานและแรงกดของเสาเข็มเพิ่มขึ้นถึงกำลังประลัยโดยการถ่ายน้ำหนักของเสานี้สร้างขึ้นจากผลของการทดสอบเสาเข็มแบบน้ำหนักบรรทุกคงที่บนเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumented Pile)

เส้นการกระจายน้ำหนักทางซ้ายมือแสดงพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มในสภาวะระยะยาว (Long-Term) โดยเกิดแรงต้านทานบางส่วนที่ปลายเสาเข็ม โดยน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อเสาเข็ม จะทำให้เกิดแรงเสียดทานบวกในช่วงระหว่างปลายเสาเข็มกับ Neutral Plane และแรงเสียดทานลบจะเกิดขึ้นเหนือระดับ Neutral Plane ขึ้นไปจนถึงระดับหัวเสาเข็ม

จากรูป 2.1(a), (b) และ (c) สามารถสังเกตตำแหน่งของ Neutral Plane ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี โดย Neutral Plane เกิดขึ้นในระดับเดียวกัน

Endo et al. (1969) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแรงจุดที่เกิดขึ้นบนเสาเข็มจำนวน 4 ต้น ในประเทศญี่ปุ่น โดยมีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดที่เสาเข็ม และมีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำให้มีทิศลงด้านล่าง (Downward Gradient) เพื่อทำให้เกิดการทรุดตัวของดินรอบเสาเข็ม

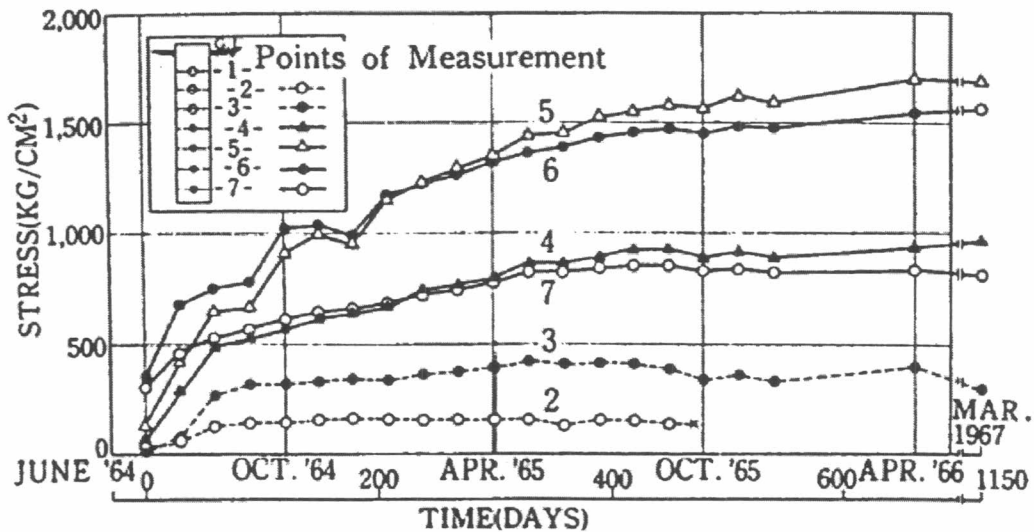
ลักษณะของชั้นดินประกอบด้วยชั้น Silty Sand หนา 10 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้น Silt หนาประมาณ 15 เมตรหลังจากนั้นจะเป็นชั้น Sandy Silt สลับกับ Silt จนถึงความลึกประมาณ 44 เมตรจากผิวดินและจากนั้นจะเป็นชั้นทรายละเอียด



รูป 2.2 รูปตัดด้านข้างของสถานที่ทำการวิจัยและเสาเข็มในงานวิจัยของ Endo

รูป 2.2 แสดงรูปตัดทางด้านข้างของสถานที่ทำการทดสอบ โดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวและเครื่องมือวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน (Pore Pressure) ในสถานที่ทำการวิจัย และมีการติดตั้ง Strain-Gauge ที่เสาเข็ม โดยเสาเข็มจำนวน 3 ต้น โดยเสาเข็ม 3 ต้น ถูกส่งลงไปจนถึงชั้นทรายได้แก่เสาเข็มหมายเลข cB₄₃, oE₄₃, cE₄₃, โดยเสาเข็ม cB₄₃ เป็นเสาเข็มแบบเอียง เสาเข็ม oE₄₃ และ cE₄₃ วางตัวอยู่ในแนวตั้ง เสาเข็ม cF₃₁ ถูกส่งลงไปที่จะระดับ 31 เมตร ซึ่งอยู่ในชั้น Silt

งานวิจัยเริ่มต้นในเดือนมิถุนายน 1964 และสิ้นสุดในเดือน มีนาคม 1967 โดย Endo ได้ทำการวัดค่าความเค้น (Stress) จาก Strain-Gauge จำนวน 7 ตัว ที่ทำการติดตั้งที่ระดับความลึกต่างๆของเสาเข็ม $c_{E_{43}}$ ดังรูป 2.3

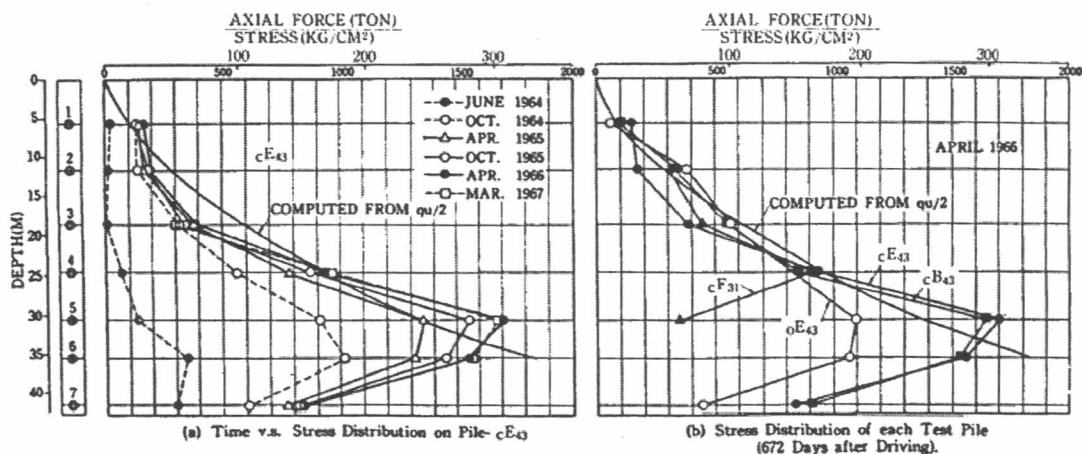


รูป 2.3 ค่าความเค้นในเสาเข็ม $c_{E_{43}}$ ที่ทำการตรวจวัดโดย Endo et al. (1969) ตั้งแต่เดือน มิถุนายน 1964 ถึง มีนาคม 1967

ความเครียดที่เกิดขึ้นในส่วนบนของเสาเข็มที่วัดได้จาก Strain-Gauge No. 2 และ 3 เกิดขึ้นมากในช่วง 3 เดือนแรกของการตรวจวัด และมีการเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยหลังจากเดือน เมษายน 1965 สำหรับส่วนล่างของเสาเข็ม (Strain-Gauge No. 4 ถึง 7) ค่าความเครียดเกิดขึ้นมากในช่วง 3 เดือนแรกเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเดือนเมษายน 1965 ค่าความเค้นจึงเริ่มคงที่

การกระจายน้ำหนักภายในเสาเข็มเป็นไปดังรูป 2.4 โดยแผนภาพทางซ้ายแสดง การกระจายน้ำหนักของเสาเข็ม $c_{E_{43}}$ ที่เวลาต่างๆ จากแผนภาพสังเกตได้ว่ามีค่าแรงเสียดทานลบ (Negative Skin Friction) และตำแหน่งของ Neutral Plane ปรากฏขึ้นที่ระดับความลึกประมาณ 30 เมตร

แผนภาพทางขวาแสดงการกระจายน้ำหนักในเสาเข็มทั้ง 4 ต้น ในเดือนเมษายน 1966 โดยสามารถสังเกตได้ว่าเสาเข็มทุกต้นมีค่าแรงเสียดทานลบที่อยู่เหนือ Neutral Plane มีค่าเท่ากับค่าแรงต้านทานที่อยู่ใต้ Neutral Plane



รูป 2.4 การกระจายน้ำหนักภายในเสาเข็มจากการทดลองของ Endo

Bengt H. Fellenius (1999) ได้กล่าวว่า Neutral Plane คือตำแหน่งของฐานรากเสมือนตามที่ Terzaghi and Peck (1948) ได้แนะนำให้ใช้เป็นระดับที่เริ่มกระจายหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

Liew Shaw Shong (2002) ซึ่งทำการศึกษาเรื่องแรงเสียดทานลบและ Neutral Plane และได้แนะนำวิธีการหาตำแหน่งของ Neutral Plane โดยใช้รูปแบบสมการซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อสมมติฐานซึ่งไม่ซับซ้อน โดยคำนวณจากการสมดุลแรงที่มากกระทำต่อเสาเข็ม

ตำแหน่งของ Neutral Plane สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสถานะของเสาเข็มแต่ละต้น โดยขึ้นกับ

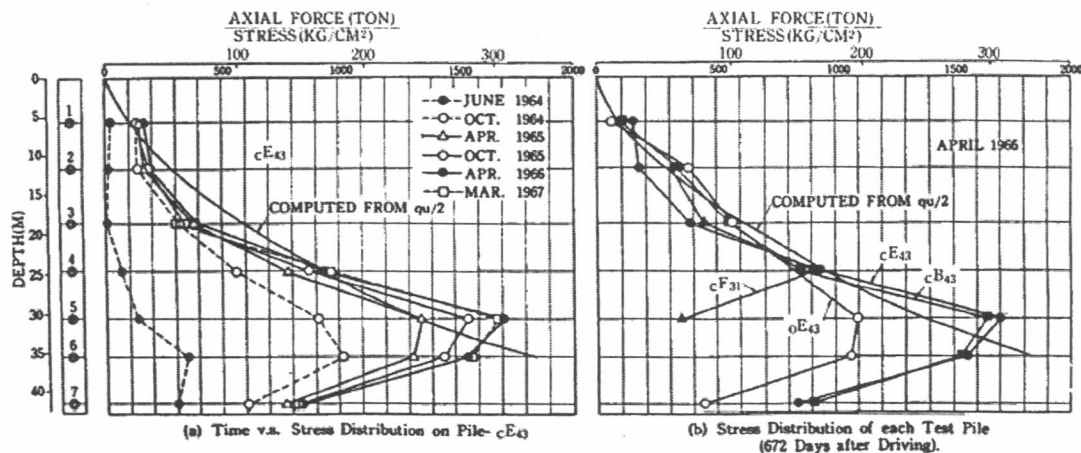
- 1) กำลังรับแรงเสียดทานประลัย
- 2) กำลังรับแรงกดประลัย
- 3) อัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็ม

เนื่องจากโครงสร้างปรับสภาพการหลุดตัวใช้เสาเข็มที่มีความยาวไม่เท่ากัน ทำให้ปัจจัยที่มีผลต่อตำแหน่งของ Neutral Plane ทั้ง 3 ปัจจัยมีความแตกต่างกันไป จึงต้องคำนวณหาตำแหน่งของ Neutral Plane ของเสาเข็มแต่ละแถว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การหลุดตัว

2.1.1 การคำนวณตำแหน่ง Neutral Plane

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง Neutral Plane มีดังต่อไปนี้

- 1) แรงเสียดทานบวก, แรงเสียดทานลบและกำลังรับแรงกดที่ปลายเสาเข็มเป็นกำลังประลัย
- 2) แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึกของเสาเข็ม
- 3) แรงเสียดทานบวก (r_u) และแรงเสียดทานลบ (q_u) มีค่าเท่ากันในระดับความลึกเท่ากัน



รูป 2.4 การกระจายน้ำหนักภายในเสาเข็มจากการทดลองของ Endo

Bengt H. Fellenius (1999) ได้กล่าวว่า Neutral Plane คือตำแหน่งของฐานรากเสมือนตามที่ Terzaghi and Peck (1948) ได้แนะนำให้ใช้เป็นระดับที่เริ่มกระจายหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

Liew Shaw Shong (2002) ซึ่งทำการศึกษารื่องแรงเสียดทานลบและ Neutral Plane และได้แนะนำวิธีการหาตำแหน่งของ Neutral Plane โดยใช้รูปแบบสมการซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อสมมติฐานซึ่งไม่ซับซ้อน โดยคำนวณจากการสมดุลแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม

ตำแหน่งของ Neutral Plane สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสถานะของเสาเข็มแต่ละต้น โดยขึ้นกับ

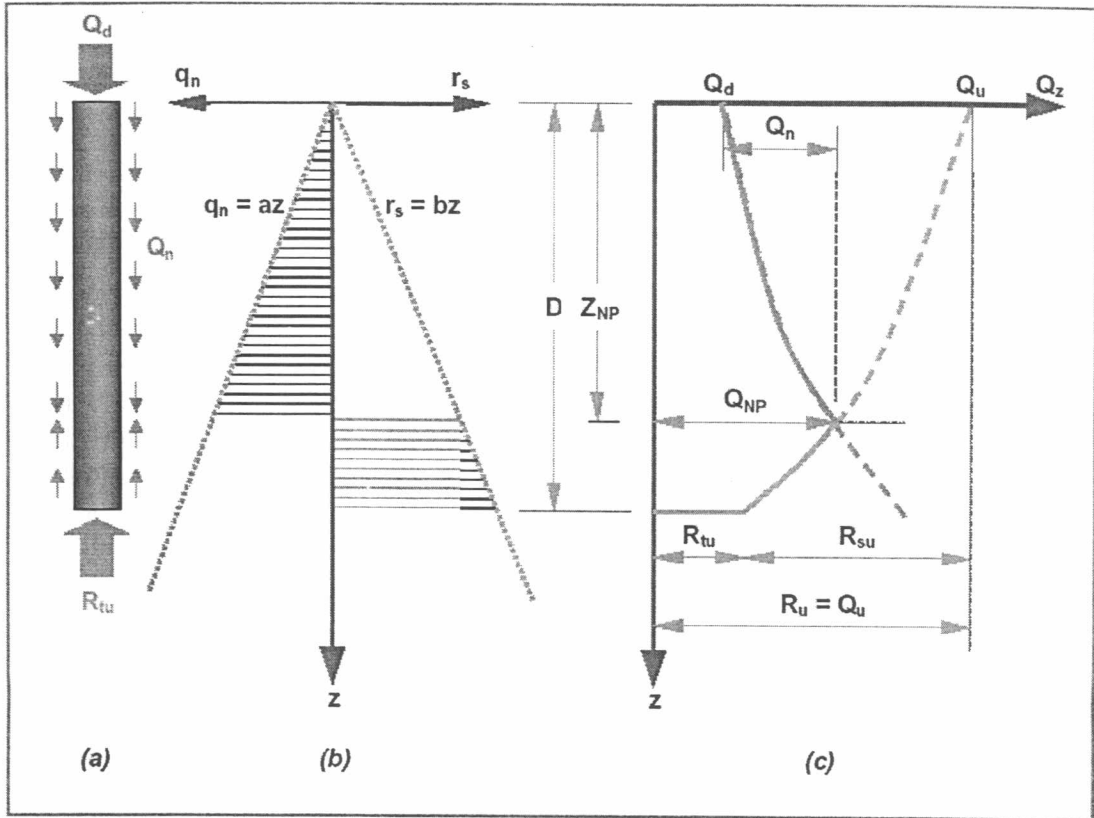
- 1) กำลังรับแรงเสียดทานประลัย
- 2) กำลังรับแรงกดประลัย
- 3) อัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็ม

เนื่องจากโครงสร้างปรับสภาพการหลุดตัวใช้เสาเข็มที่มีความยาวไม่เท่ากัน ทำให้ปัจจัยที่มีผลต่อตำแหน่งของ Neutral Plane ทั้ง 3 ปัจจัยมีความแตกต่างกันไป จึงต้องคำนวณหาตำแหน่งของ Neutral Plane ของเสาเข็มแต่ละแถว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การหลุดตัว

2.1.1 การคำนวณตำแหน่ง Neutral Plane

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง Neutral Plane มีดังต่อไปนี้

- 1) แรงเสียดทานบวก, แรงเสียดทานลบและกำลังรับแรงกดที่ปลายเสาเข็มเป็นกำลังประลัย
- 2) แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึกของเสาเข็ม
- 3) แรงเสียดทานบวก (r_u) และแรงเสียดทานลบ (q_u) มีค่าเท่ากันในระดับความลึกเท่ากัน



รูป 2.5 (a) แสดงแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม, (b) การกระจายของแรงในแนวแกนของเสาเข็ม, (c) การกระจายของหน่วยแรงเสียดทานลบและบวกตามพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม

จากรูป 2.5 (a) สามารถเขียนสมการสมดุลของแรงที่กระทำต่อเสาเข็มและแก้สมการหาตำแหน่งของ Neutral Plane ได้ดังสมการ 2.1

สมการสมดุลของแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม

$$\begin{aligned} \text{แรงกระทำ} &= \text{แรงต้านทาน} \\ \text{น้ำหนักบรรทุกทุก + แรงจุด} &= \text{แรงเสียดทานประลัย + แรงกดประลัย} \end{aligned}$$

$$\frac{Z_{np}}{D} = \sqrt{\frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{1}{FS} \right)}$$

สมการ 2.1

$$\text{เมื่อ } \alpha = \frac{R_u}{R_{su}}$$

คำจำกัดความ

D	=	ความยาวเสาเข็ม	
Z_{np}	=	ความลึกของ Neutral Plane	
Q_d	=	น้ำหนักบรรทุก	
R_{tu}	=	กำลังรับแรงกดประลัยที่ปลายเสาเข็ม	
R_{su}	=	กำลังรับแรงเสียดทานประลัยตลอดความยาวของเสาเข็ม	
R_u	=	$R_{su} + R_{tu}$	
FS	=	อัตราส่วนความปลอดภัย	= R_u / Q_d

จากสมการ 2.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่นำมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของ Neutral Plane เป็นตัวแปรที่สามารถคำนวณจากพารามิเตอร์ของดินในสถานที่ก่อสร้างและแบบก่อสร้าง

2.1.2 น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- น้ำหนักบรรทุกคงที่ ได้แก่ น้ำหนักวัสดุถม, น้ำหนักผิวการจราจร (กรณี Rigid Pavement) และน้ำหนักแผ่นพื้นคอนกรีต
- น้ำหนักบรรทุกจร ได้แก่ น้ำหนักของยานพาหนะ ซึ่งใช้น้ำหนักตามมาตรฐาน AASHTO HS26-40 ซึ่งกำหนดให้ใช้เท่ากับ 1 ตันต่อตารางเมตร

2.1.3 การกระจายหน่วยแรง (Stress Distribution)

การกระจายหน่วยแรงจะทำการกระจายหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกลงจากฐานรากด้วยอัตราส่วน 2:1 (ตั้ง : ราบ) โดยสามารถแบ่งการกระจายหน่วยแรงตามพฤติกรรมการรับน้ำหนักได้เป็น 2 ประเภท

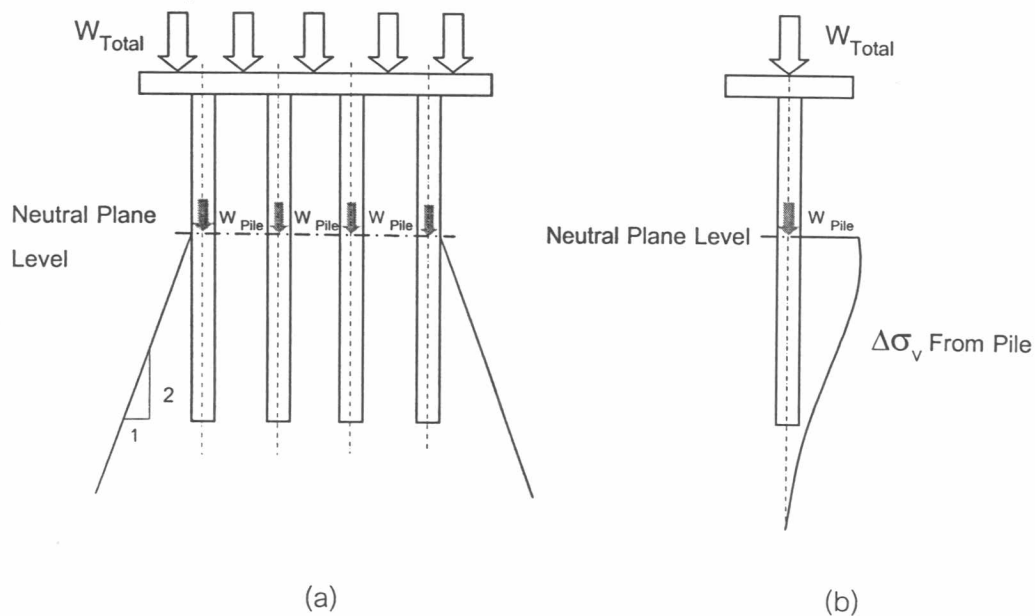
- 1) กรณีเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

การกระจายหน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจะเริ่มกระจายจากตำแหน่งของ Neutral Plane ของเสาเข็มต้นนั้นๆ

- 2) กรณีเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกร่วมกับแผ่นพื้นคอนกรีต

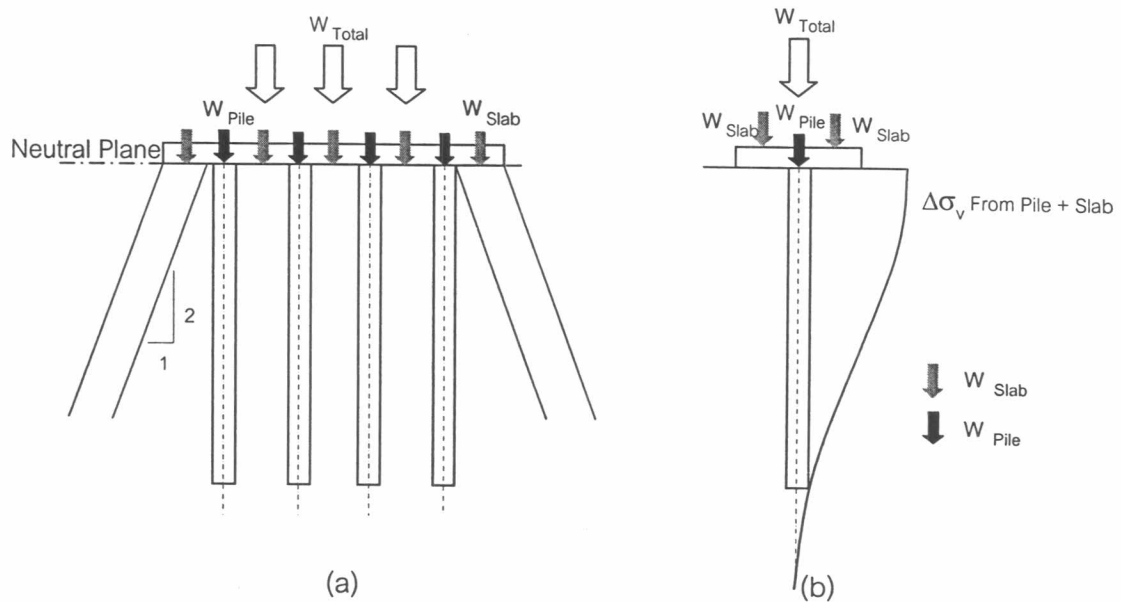
การกระจายหน่วยแรงของเสาเข็มจะกระทำเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 โดยในกรณีนี้ระดับของ Neutral Plane จะอยู่ที่หัวเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกทุกส่วนที่แผ่นคอนกรีตรับจะเริ่มกระจายจากระดับท้องของแผ่นพื้นคอนกรีต

หน่วยแรงที่เกิดจากการกระจายจากทั้งเสาเข็มและแผ่นพื้นคอนกรีตจะถูกนำมา รวมกันเป็นหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุก โดยจะพิจารณาหน่วยแรงตามแนวแกนของเสาเข็มเท่านั้น



$$W_{\text{Total}} = \text{น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด} ; W_{\text{Pile}} = \text{น้ำหนักที่ถ่ายลงเสาเข็ม}$$

รูป 2.6 การกระจายหน่วยแรงในกรณีเสาเข็มรับน้ำหนักทั้งหมด (a) รูปตัดตามขวาง, (b) รูปตัดด้านข้าง



W_{Total} = น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด, w_{Pile} = น้ำหนักที่ถ่ายลงเสาเข็ม, w_{Slab} = น้ำหนักที่ถ่ายลงแผ่นพื้น

รูป 2.7 การกระจายหน่วยแรงในกรณีเสาเข็มรับแรงร่วมกับแผ่นคอนกรีต , (a) รูปตัดตามขวาง, (b) รูปตัดด้านข้าง

2.1.4 การวิเคราะห์การทรุดตัว

การวิเคราะห์การทรุดตัวในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำหลัก (Primary Consolidation Settlement) ซึ่งจะเกิดเฉพาะในดินเหนียว โดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi (1948) แบบ 1 มิติ (One Dimensional Consolidation Settlement) แต่จะทำการพิจารณาการทรุดตัวในแบบ 2 มิติ ซึ่งหน่วยแรงที่กระจายมาจากฐานรากจะมีค่าลดลงตามความลึกของชั้นดิน

วิธีการคำนวณการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (ρ_c) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในรูปของ ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index, RR) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index, CR)

1. สำหรับดินเหนียวที่เป็น Normally Consolidated Clay, NC Clay ($\sigma'_{vo} = \sigma'_p < \sigma'_{vf}$)

$$\rho_c = \sum \left(CR \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} \cdot \Delta h \right) \quad \text{สมการ 2.2}$$

2. สำหรับดินเหนียวที่เป็น Over Consolidated Clay, OC Clay ($\sigma'_{vo} = \sigma'_p < \sigma'_{vf}$)

$$\rho_c = \sum \left[\left(RR \cdot \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} + CR \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \cdot \Delta h \right] \quad \text{สมการ 2.3}$$

2.1.5 การคาดคะเนอัตราการทรุดตัว (Rate of Consolidation)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องทำการตรวจสอบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ซึ่งยังไม่สิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ และทำการวิเคราะห์การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อตรวจสอบความลาดชันของผิวการจลาจรว่าปลอดภัยต่อการใช้งานหรือไม่ การคาดคะเนการทรุดตัวจึงถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

การคาดคะเนอัตราการทรุดตัวในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการตามทฤษฎีของ Terzaghi (1925) โดยมีข้อสมมติฐานสำหรับพฤติกรรมของดินเหนียวดังนี้

- 1) ดินเหนียวเป็นดินที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
- 2) ดินเหนียวอัดตัวด้วยน้ำ
- 3) การทรุดตัวของดินเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอันเนื่องมาจากน้ำถูกบีบออกช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพียงอย่างเดียว
- 4) การทรุดตัวเกิดได้เพียง 1 มิติ ในแนวดิ่ง
- 5) การไหลของน้ำเป็นไปตามกฎของ Darcy
- 6) ค่าสัมประสิทธิ์การซึม (k) และสัมประสิทธิ์การอัดตัวเชิงปริมาตร (m_v) มีค่าคงที่ระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ

สมการการยุบอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi, Lambe and Whitman (1969) คือ

$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = \frac{C_v \partial^2(\Delta u)}{\partial z^2} \quad \text{สมการ 2.4}$$

- โดย Δu = แรงดันน้ำส่วนเกิน
 Z = ระยะทางเดินของน้ำนับจากขอบบนของชั้นดินที่ยุบอัดตัวได้
 t = เวลา
 C_v = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวดิ่ง

จากสมการ 2.4 สามารถหาค่าการทรุดตัวที่เวลาใดๆ ได้ดังสมการ

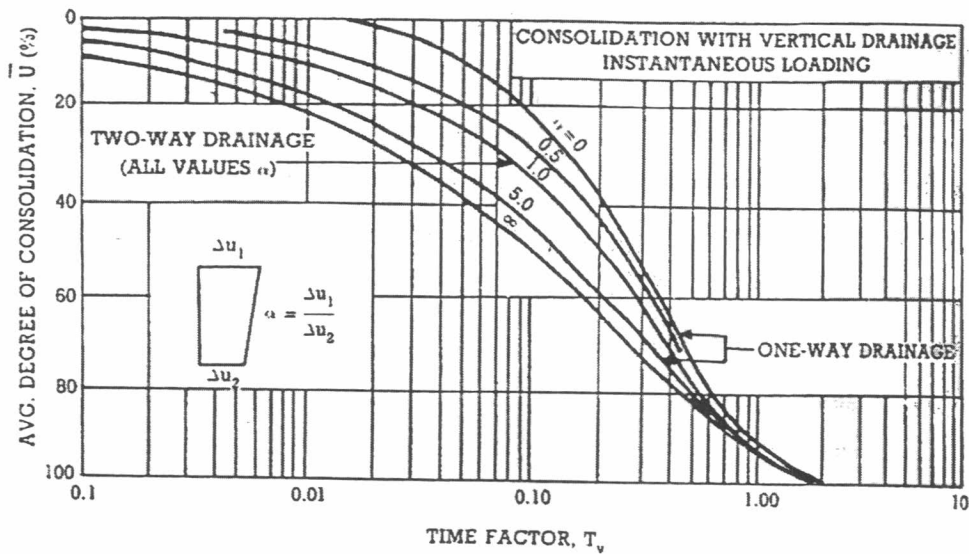
$$\rho(t) = \bar{U}_z \rho_c \quad \text{สมการ 2.5}$$

- โดย $\rho(t)$ = การทรุดตัวที่เวลาใดเวลาหนึ่ง
 \bar{U}_z = Average Degree of Consolidation
 ρ_c = การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำทั้งหมด

\bar{U}_z เป็นฟังก์ชันกับ T_v (Time Factor) และสามารถเขียนได้ในรูปสมการ

$$\bar{U}_z = 1 - \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{2}{M^2} \right) e^{(-M^2 T_v)} \quad \text{สมการ 2.6}$$

โดย $T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \quad \text{สมการ 2.7}$



รูป 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_z กับ T_v ในกรณีที่ Δu_0 เปลี่ยนแปลงตามความลึก

Terzaghi (1925) ยังได้เสนอว่าความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_z กับ T_v ยังสามารถเขียนในรูปแบบดังสมการ 2.8 และ 2.9

กรณี $0 < \bar{U}_z < 53\%$ $T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{U}_z}{100} \right)^2$ สมการ 2.8

กรณี $53\% < \bar{U}_z < 100\%$ $T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - \bar{U}_z)$ สมการ 2.9

2.1.6 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มใช้วิธีการ α - Method (Total Stress Approach)

กำลังรับแรงเสียดทาน, Q_s (Skin Friction Capacity)

กำลังรับแรงเสียดทาน (Q_s) สามารถคำนวณได้จากสมการ

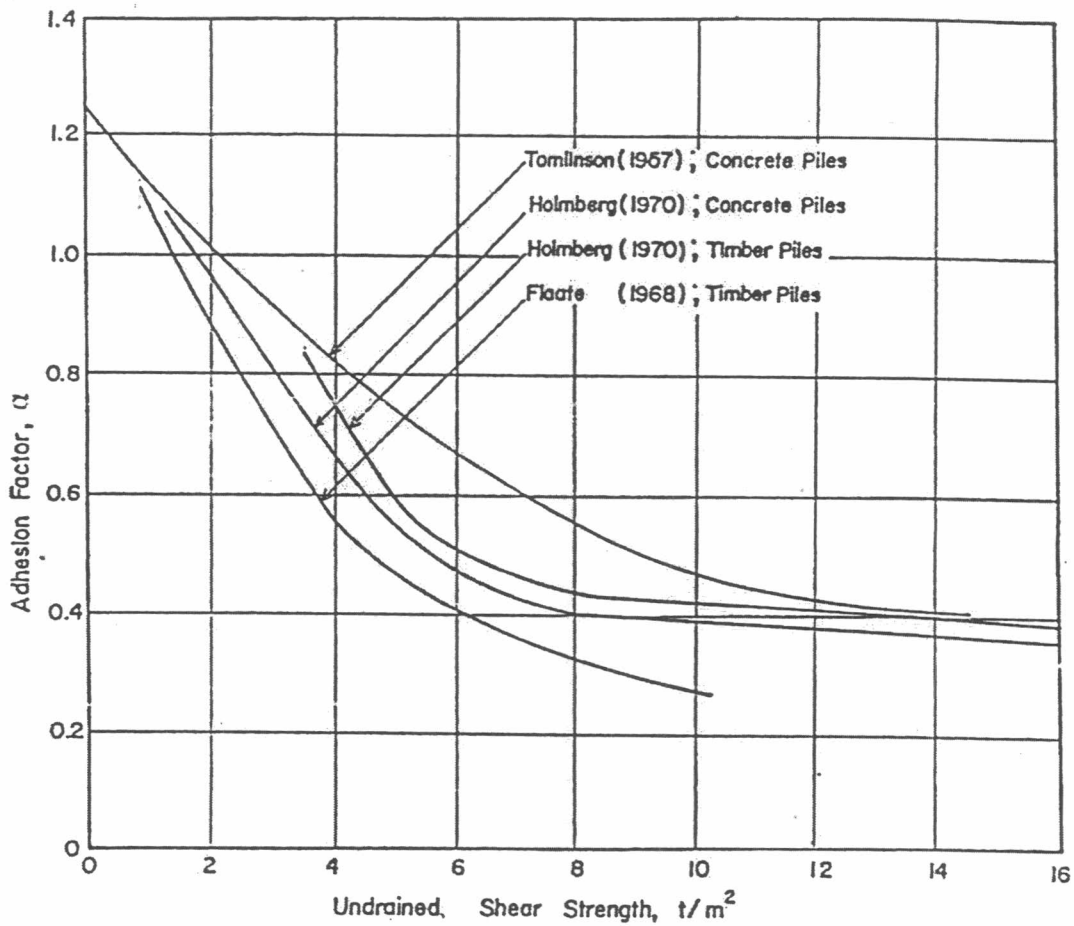
$$Q_s = \alpha \cdot S_u \cdot A_s$$

โดย Q_s = กำลังรับแรงเสียดทานประลัย

- S_u = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
 α = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Adhesion Factor)
 A_s = พื้นที่ผิวรับแรงเสียดทานของเสาเข็ม

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, α (Adhesion Factor)

ใช้ข้อมูลของ Holmberg, 1970 (รูป 2.9)



รูป 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

กำลังรับแรงกดที่ปลายเสาเข็ม , Q_b (End Bearing Capacity)

$$Q_b = N_c \cdot S_u \cdot A_b$$

โดย Q_b = กำลังรับแรงกดประลัย

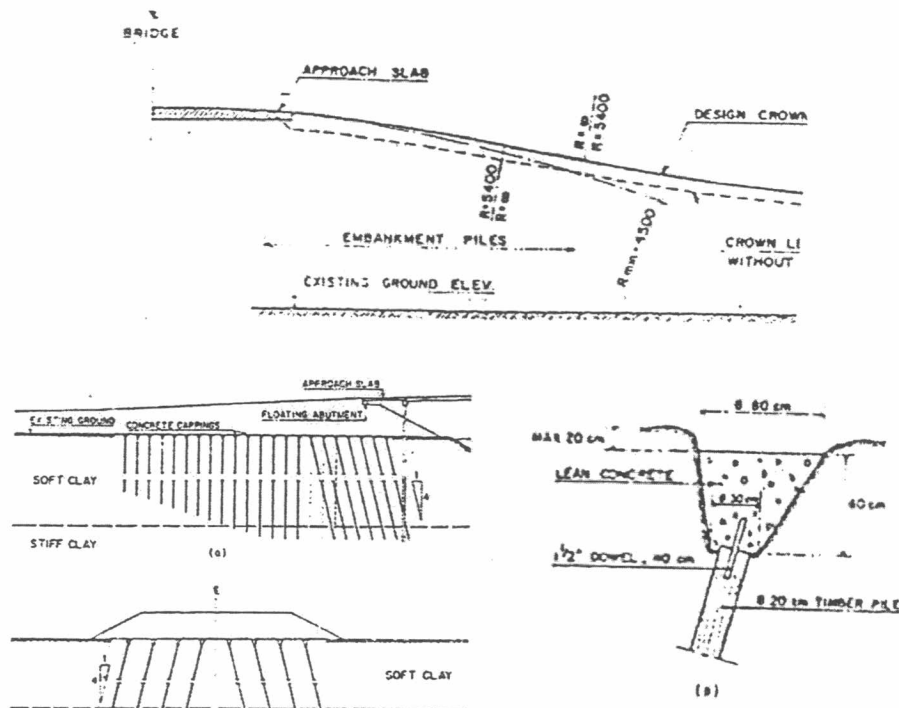
N_c = Bearing Capacity Factor

A_b = พื้นที่รับแรงกดของเสาเข็ม

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประวัติการศึกษาโครงสร้างปรับปรุงสภาพการทรุดตัวในประเทศไทย

Soren Holmberg (1978) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณชั้นดินอ่อน โดยใช้เสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง (Embankment Piles) บนทางหลวงสายบางปะอิน-นครสวรรค์



รูป 2.10 แบบโครงสร้างปรับปรุงสภาพการทรุดตัวบนทางหลวงสายบางปะอิน-นครสวรรค์

Holmberg สรุปว่าระยะห่างและความยาวของเสาเข็มจะเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการออกแบบ โดยช่วงที่อยู่ใกล้สะพาน น้ำหนักดินถมจะถูกถ่ายลงเสาเข็มทั้งหมด และในส่วนที่ห่างจากสะพานออกไป ความยาวเสาเข็มจะค่อยๆลดลงและมีระยะห่างมากขึ้น ดังนั้น น้ำหนักคันทางจะถูกถ่ายให้ดินรับมากขึ้น

ทางหลวงสายบางปะอิน-นครสวรรค์ หลังจากเปิดการจราจร 6 ปี ผิดการจราจร ยังคงราบเรียบสม่ำเสมอ (Smooth Transition)

ดร.วิชาญ ภูพัฒน์ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณชั้นดินอ่อนในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล ซึ่งมีการปรับปรุงใช้ในหลายวิธีการ ได้แก่

1) การใช้เสาเข็มผ่อนความยาวร่วมกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

การใช้เสาเข็มผ่อนความยาวร่วมกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทำการศึกษาที่สะพานคลองจระเข้ถนนสายบางนา-บางปะกง ผลปรากฏว่าการทรุดตัวในช่วงที่มีเสาเข็มหยั่งลึกถึงดินแข็งเกิดขึ้นเล็กน้อยที่คอสะพานด้านบางนา และมีการทรุดตัวที่ไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นที่ช่วงปลายของส่วนที่ตอกเสาเข็มทำให้เกิดลักษณะเป็นคลื่น ส่วนที่คอสะพานด้านบางปะกงเกิดการทรุดตัวในลักษณะเดียวกัน จากการใช้วิธีการดังกล่าวทำให้ปริมาณการทรุดตัวจากสะพานมีแนวโน้มว่าจะผ่อนจากน้อยไปหามาก แต่การปรับสภาพทรุดตัวยังเกิดขึ้นไม่ดีเท่าที่ควรจนทำให้เกิดเป็นลอนคลื่นขนาดใหญ่

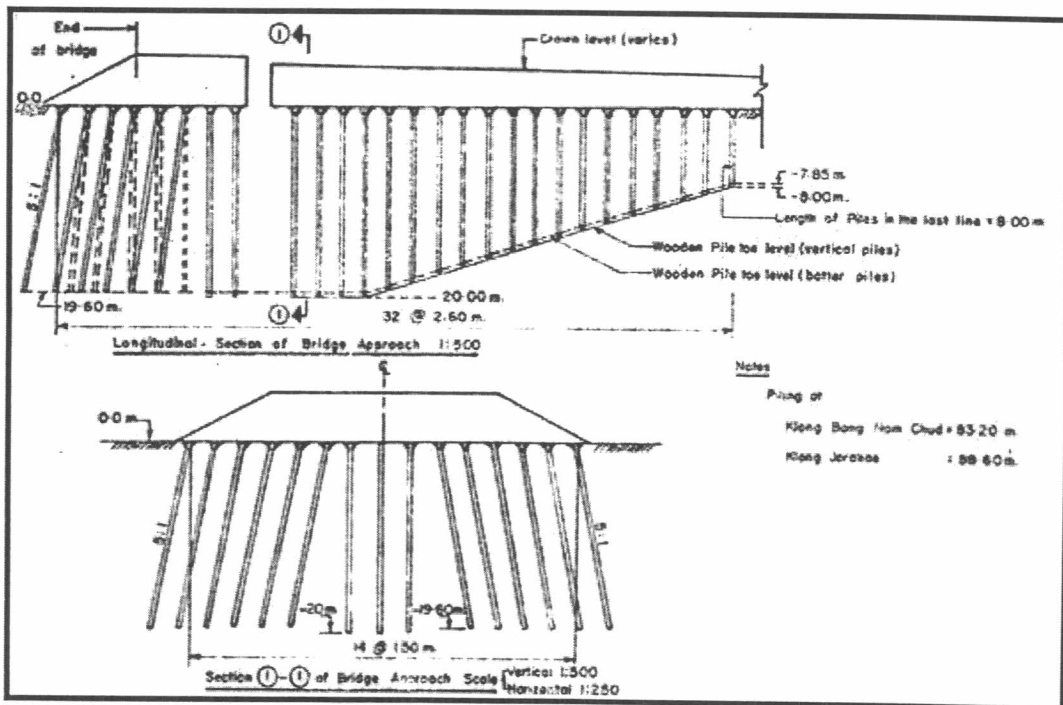
2) การใช้วัสดุถมที่มีน้ำหนักเบา

การใช้วัสดุถมที่มีน้ำหนักเบา ได้แก่ ซีเมนต์ผสมปูนขาว ทำการทดลองใช้ที่ถนนสายธนบุรี-ปากท่อ เมื่อปี พ.ศ. 2517 ปรากฏว่าเกิดการทรุดตัวบริเวณที่มีการใช้วัสดุเบามากกว่าช่วงที่เป็นถนนธรรมดาตามาก โดยช่วงคอสะพานเกิดการทรุดตัวประมาณ 60 ซม. ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการทรุดตัวมากที่สุด จากการเก็บข้อมูลเมื่อปี 2520 ช่วงปลายของช่วงที่ใช้วัสดุเบาเกิดรอยคลื่นและเกิดแอ่ง อันเกิดจากแรงกระแทก จุดที่น่าสังเกตคือช่วงระยะแรกการทรุดตัวทางด้านธนบุรีเกิดขึ้นสูงกว่าด้านปากท่อเนื่องจากปริมาณการจราจรจากทางปากท่อเข้าธนบุรีมีปริมาณสูงกว่า เมื่อเวลาผ่านไปการทรุดตัวทางด้านปากท่อกลับสูงกว่าทางด้านธนบุรี เนื่องจากปริมาณการจราจรทางด้านธนบุรีออกไปทางปากท่อกลับสูงกว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากน้ำหนักจากรถบรรทุก และแรงกระแทกจากการกระโดดของรถบรรทุก ช่วงลงจากสะพาน โดยช่วงขึ้นสะพานจะได้รับผลกระทบจากแรงกระแทกน้อยกว่า จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการดังกล่าวไม่สามารถใช้ปรับสภาพการทรุดตัวของคอสะพานได้

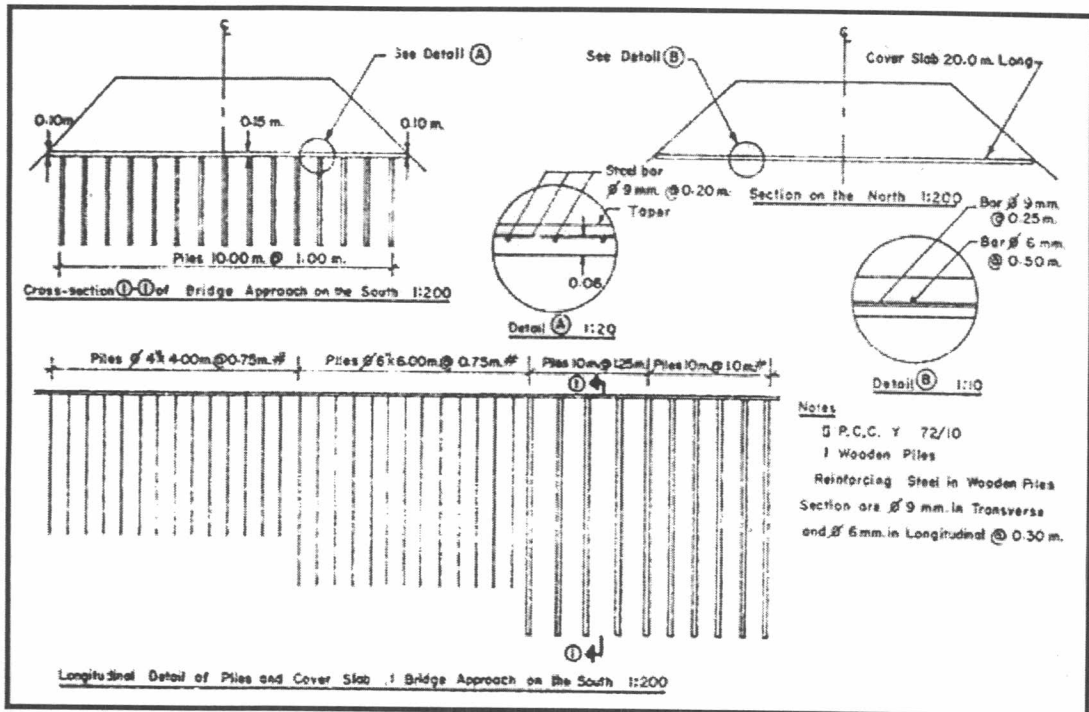
3) การใช้วิธีแรงอัดการทรุดตัว (Preloading)

การใช้วิธีแรงอัดการทรุดตัว (Preloading) ทดลองใช้ที่สะพานข้ามแยกสุทธิสาร เมื่อทำการเปิดการจราจรและวัดผลการทรุดตัวในระยะ 5 เดือน ผลปรากฏว่าเกิดการทรุดตัวเป็นแอ่งที่ระยะ 20 เมตรจากคอสสะพานทั้งสองด้านโดยด้านดินแดงเกิดการทรุดตัวประมาณ 2.5 เซนติเมตร ในขณะที่ทางด้านลาดพร้าวเกิดการทรุดตัวมากกว่าโดยเกิดประมาณ 6.5 เซนติเมตร การทรุดตัวดังกล่าวที่ระยะ 20 เมตร จากคอสสะพานทั้งสองด้านน่าจะเกิดจากแรงกระแทกจากการกระโดดของรถเช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ

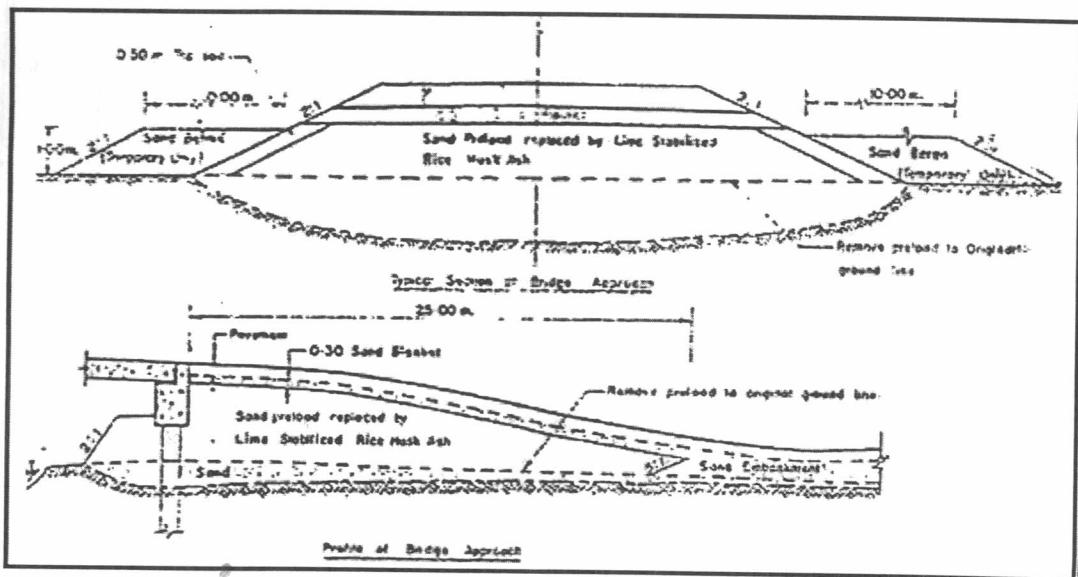
จากการวิเคราะห์ผลการทรุดตัวจากโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวในกรณีต่างๆ ดร.วิชาญ ได้สรุปว่าวิธีการใช้เสาเข็มผ่นความยาวโดยมีแผ่นคอนกรีตอยู่บนหัวเสาเข็ม ทำการปรับสภาพการทรุดตัวได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ



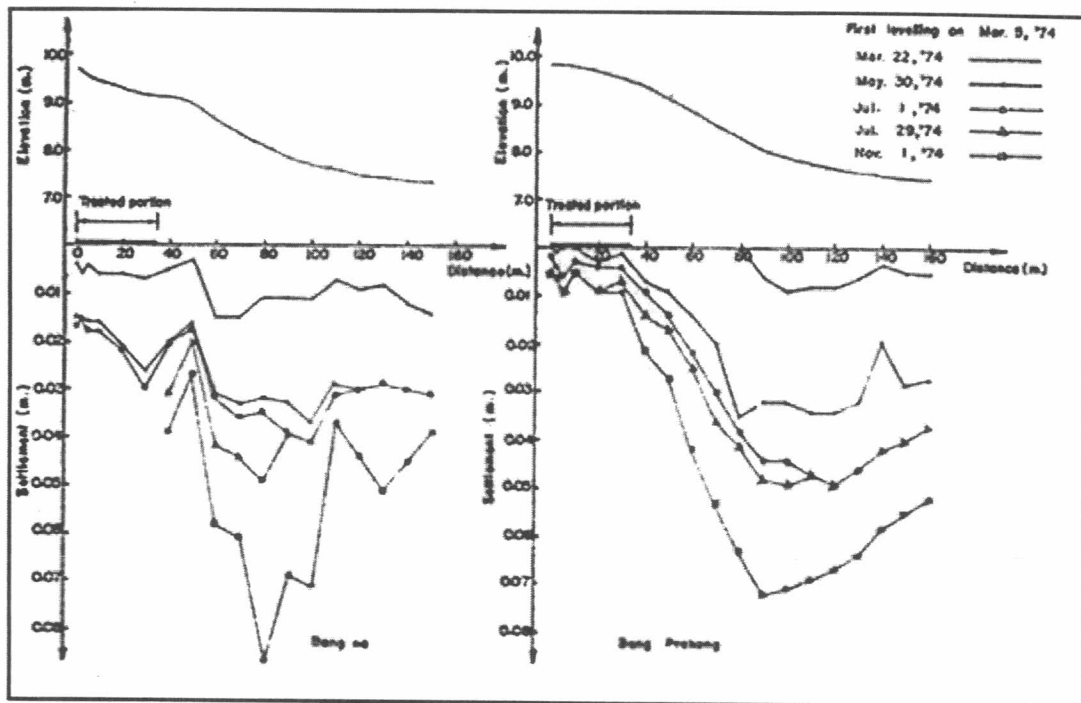
รูป 2.11 โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวแบบเสาเข็มผ่นความยาวบนทางหลวงบางนา-บางปะกง



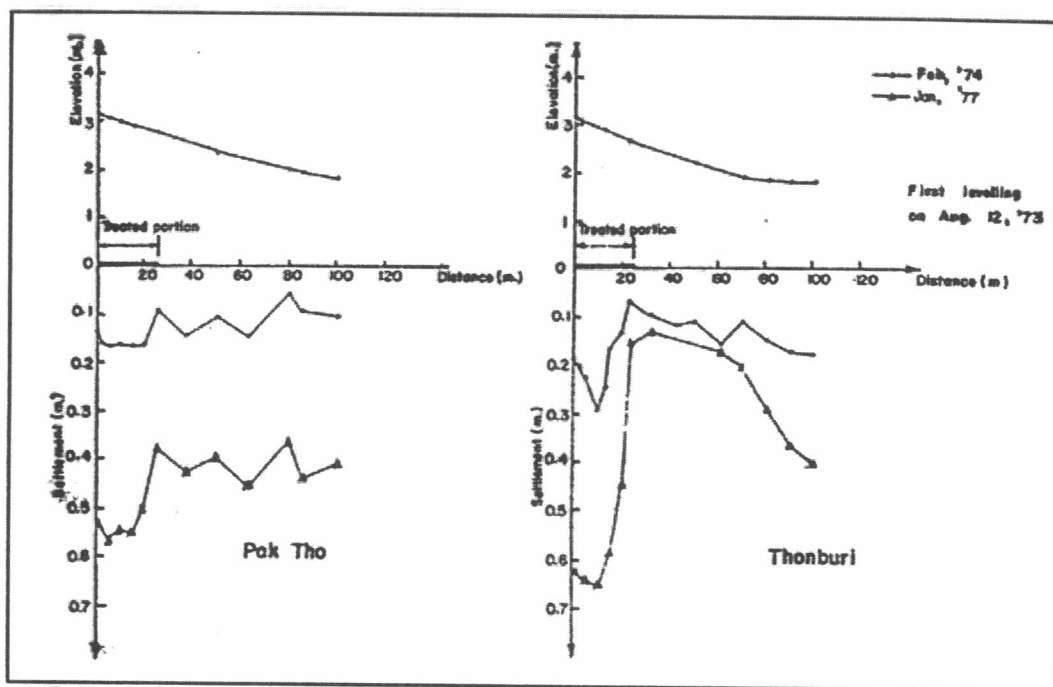
รูป 2.12 โครงสร้างปรับปรุงการทรุดตัวแบบเสาเข็มผืนความยาวทางหลวงคลองด่าน-บางปะ



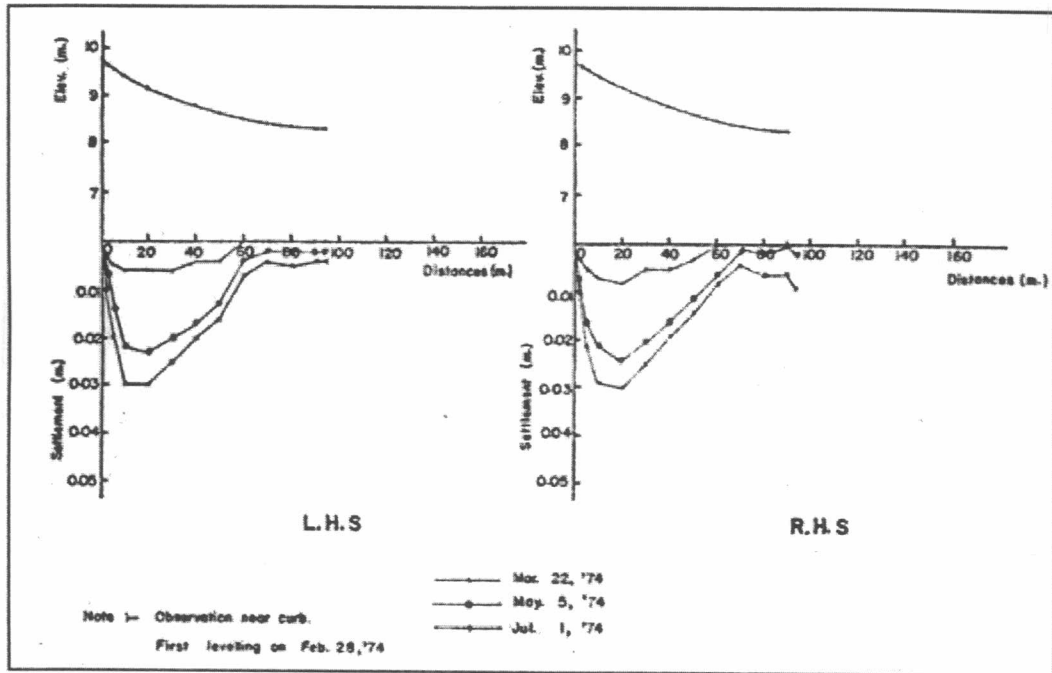
รูป 2.13 โครงสร้างปรับปรุงการทรุดตัวโดยใช้วัสดุถมที่มีน้ำหนักเบา ทางหลวงสายธนูรี-ปากท่อ



รูป 2.14 การทรุดตัวของผิวถนนสะพานคลองจระเข้ ทางหลวงสายบางนา-บางปะกง



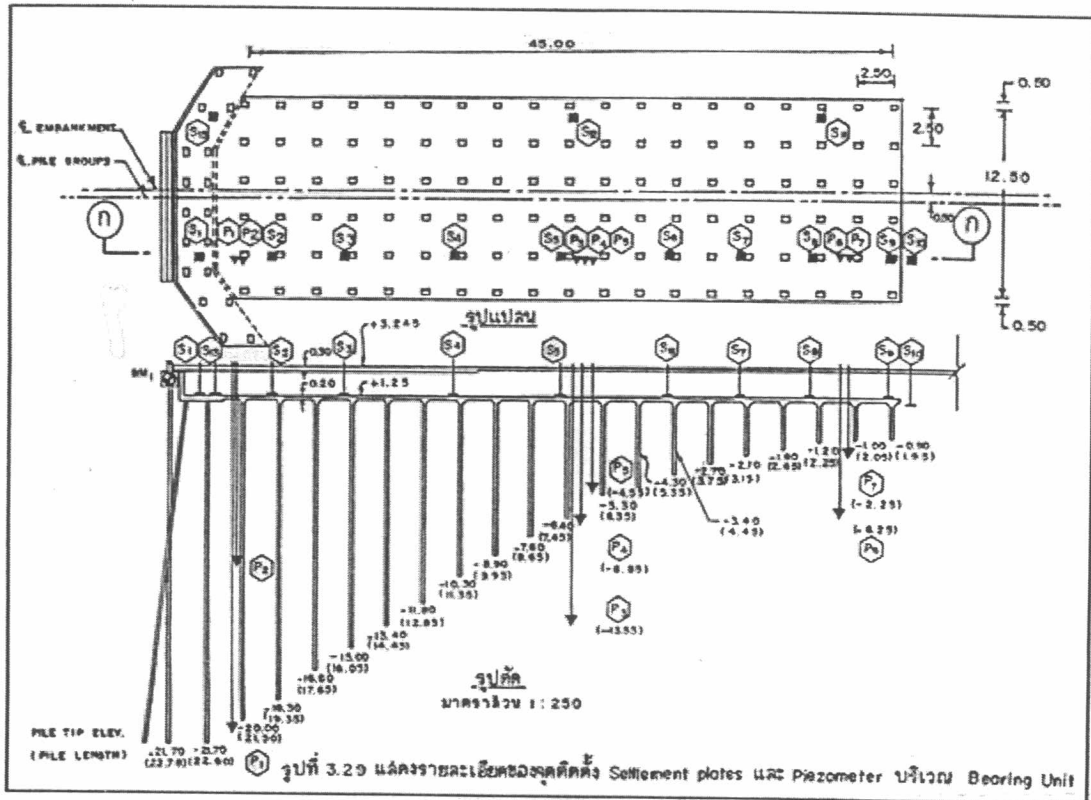
รูป 2.15 การทรุดตัวของผิวถนนของสะพานคลองพระยาราชมนตรีบนทางหลวงสายธนบุรี-ปากท่อ



รูป 2.16 การทรุดตัวของผิวการจราจรของสะพานข้ามแยกสุทธิสาร

ทินกร โรจนธรา ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวที่สะพานคลองปลัดเปรียง บนทางหลวงสายบางนา-บางปะกง เป็นเวลา 9.8 เดือน และนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่จะใช้ในการคาดคะเนปริมาณการทรุดตัว

โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวมีความยาวประมาณ 50 เมตร โดยใช้เสาเข็มรูปตัวไอขนาด 0.22×0.22 เมตร มีความยาวตั้งแต่ 22.7 เมตร ที่คอสะพานและลดความยาวของเสาเข็มเหลือ 1 เมตร ที่ปลายของโครงสร้าง โดยใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2.5 เมตร และมีแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 0.20 เมตรยึดระหว่างหัวเสาเข็ม ดินถมคันทางมีความสูงประมาณ 2 เมตร



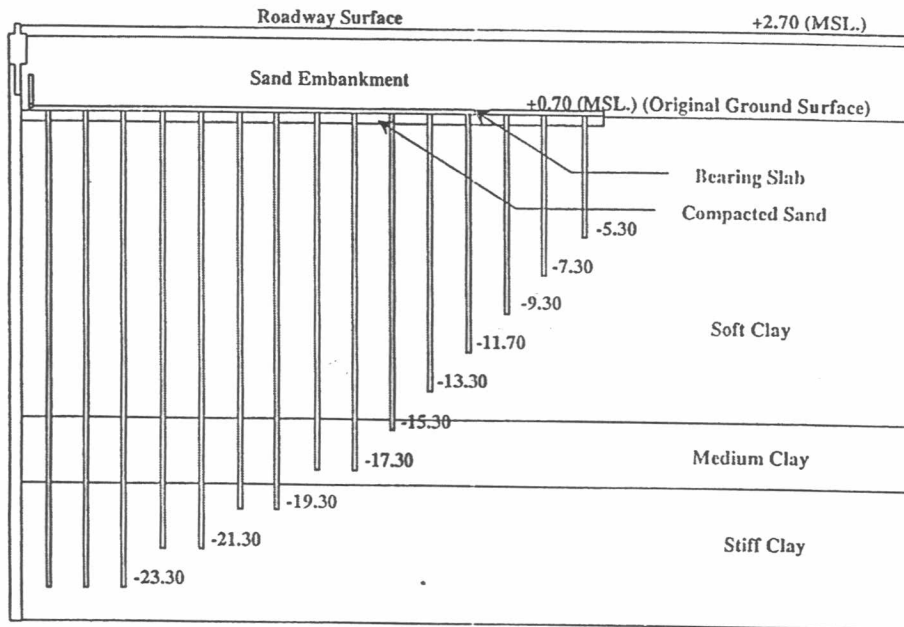
รูป 2.17 แบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวของสะพานคลองปลัดเป็เรียง กม.6+402 (ทินกร, 2528)

จากผลการวิเคราะห์ ทินกร(2528) สรุปว่าวิธีการของ Poulos & Davis (1980) ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับสภาพการทรุดตัวจริงมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างค่าจากการคำนวณต่อค่าการทรุดตัวจริงอยู่ในช่วงประมาณ 1.02 ถึง 1.67 และแนะนำให้ใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 7 ถึง 11 เท่าของขนาดเสาเข็ม

Kraisorn(2000) ได้ทำการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวของสะพาน กม. 31 ของบนทางหลวงสายบางนา-บางปะกง หลังจากทำการก่อสร้างเสร็จไปแล้วเป็นเวลา 8 ปี โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ "Individual Pile" กระจายหน่วยน้ำหนักจากปลายเสาเข็มโดยใช้วิธีการของ Boussinesq ความเค้น (Stress) ที่เพิ่มขึ้นในดินเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกที่ได้เสาเข็มจะเป็นค่าความเค้นรวมระหว่างค่าความเค้นที่กระจายหน่วยแรงมาจากเสาเข็มต้นนั้นๆและเสาเข็มต้นข้างเคียง

โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวมีความยาวประมาณ 30 เมตร โดยใช้เสาเข็มรูปตัวไอขนาด 0.22 x 0.22 เมตร มีความยาวตั้งแต่ 24 เมตร ที่คอสะพานและลดความยาวของ

เสาเข็มเหลือ 6 เมตร ที่ปลายโครงสร้าง โดยใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2 เมตร และมีแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 0.20 เมตรยึดระหว่างหัวเสาเข็ม ดินถมมีความสูงประมาณ 2 เมตร



รูป 2.18 แบบโครงสร้างปรับปรุงสภาพการทรุดตัวของสะพาน กม. 31 (Kraisorn, 2000)

ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าวิธีการที่ Kraisorn (2000) นำเสนอ ให้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงมาก โดยผลจากการวิเคราะห์ต่างจากค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุดเพียง 8 เซนติเมตร